

COMPARAÇÃO DE MODELOS DE ESTOQUE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO: ESTUDO DE CASO DE UMA EMPRESA METALÚRGICA EM UM AMBIENTE DE DEMANDA ESTOCÁSTICA.

luiz eduardo wilbert albernaz andrade (USP)
lew@usp.br

Hugo Tsugunobu Yoshida Yoshizaki (USP)
hugo@usp.br

Roberto Fray da Silva (USP)
roberto.fray.silva@gmail.com



O presente artigo tem por objetivo analisar os modelos de gestão de estoques em um ambiente de demanda estocástica. São analisados os custos anuais de estoque, set-up e de falta dos modelos de pedido Uniforme, EOQ e Silver Meal, em três diferentes cenários. Simulações foram feitas utilizando o software @Risk. O primeiro cenário analisa o uso destes modelos em um ambiente sem variação de demanda. O segundo, por sua vez, incorpora diferentes coeficientes de variação de demanda. O último cenário introduz o conceito de estoque de segurança nos modelos. É feita uma comparação entre os resultados dos três cenários. O resultado demonstra que, em um ambiente de demanda estocástica, o modelo de Silver Meal é mais suscetível a sofrer custos de falta, por se tratar de um modelo com estoque médio menor. Desta forma, é necessário incorporar um estoque de segurança a fim de reduzir o stockout e tornar este modelo eficaz.

Palavras-chaves: administração do estoque, modelos de gestão do estoque, simulação

1. Introdução

Segundo Correa (2000), a dinâmica do mercado foi modificada pela evolução dos sistemas logísticos, introduzindo uma nova cultura de gestão nas empresas. Nas últimas décadas, esta dinâmica evidenciou o papel da logística e da gestão da cadeia de suprimentos, transformando as mesmas em ferramentas que proporcionam, quando bem utilizadas, vantagem competitiva (BOWERSOX, CLOSS & COOPER, 2008). Esta, por sua vez, leva a maior probabilidade de sobrevivência no mercado a longo prazo.

Com o aumento dos custos de capital e de oportunidade observados neste período, a gestão de estoques se tornou uma área com grandes contribuições na redução de custos e aumento do nível de serviço aos clientes (BALLOU, 2004). No caso do Brasil, pode-se observar que, em meados dos anos 90, praticamente não existia vantagem para as empresas em gerenciar seus estoques, pois a instabilidade econômica e a inflação criavam vantagens no estabelecimento de estoques especulativos (WANKE, 2003).

Segundo Fleury, Wanke & Figueiredo (2000), este cenário se modificou com a implantação do Plano Real, o controle da inflação e a vontade do consumidor em colaborar com a estabilidade da nova moeda. Desta forma, as empresas sentiram uma necessidade de investir em novos processos de gestão de custos, visando aumentar sua excelência operacional. Uma destas estratégias é a correta gestão de estoques, que influencia tanto no custo total da empresa quanto no nível de serviço oferecido aos diferentes clientes.

O estoque na cadeia de suprimentos é definido como o acúmulo de matérias-primas, componentes, suprimentos e produtos acabados ao longo da mesma (WANKE, 2003; BALLOU, 2004). A existência de estoques se justifica devido ao fato de que a demanda futura dos consumidores é imprevisível, mesmo que diversos métodos sejam utilizados para sua determinação. Segundo Arnold & Stephen (2001), o custo de manutenção de estoques pode variar de 20% a 60% dos ativos no balanço de uma empresa.

Os estoques, segundo Ryzin (2001), existem devido ao desbalanceamento que ocorre entre o suprimento de produtos pela indústria e a demanda dos mesmos pelo consumidor ao longo do tempo. Como a demanda dos consumidores é incerta, as empresas optam por uma estratégia de construção de estoques visando suprir períodos de alta demanda, aumentar o nível de serviço e aumentar descontos em seus pedidos. Li (1992) afirma que ao se decidir por utilizar estoques, se faz necessário adotar uma política de gerenciamento de estoques, a qual, de forma geral, está ligada ao modelo de produção adotado pela empresa. Este pode ser definido como puxado (*pull*) ou empurrado (*push*).

Segundo Bowersox et al. (2008), a falta de estoques de matérias-primas pode levar a paradas no processo de produção, gerando custos na modificação da programação, além de diminuir a eficiência do processo de produção. Já no caso de produtos acabados, a falta de estoques pode levar a vendas perdidas, gerando menos receita para a empresa.

Porém, o excesso de estoques também causa diversos problemas: aumento de custos de armazenamento, maior quantidade de capital investido nos bens físicos e alta taxa de obsolescência, principalmente no caso de produtos perecíveis como alimentos (BALLOU, 2004; WANKE, 2003).

Graves, Kan & Zipkin (1993) demonstram uma série de técnicas para manutenção de estoques, sendo que as principais são: modelo de lote econômico de compra, ou EOQ, e modelo heurístico de Silver-Meal. As principais diferenças entre os dois diz respeito à

metodologia adotada e às premissas de cada modelo.

Este artigo apresenta um estudo comparativo entre estes dois modelos, aplicados ao gerenciamento de estoques de uma empresa metalúrgica. A principal inspiração para o mesmo foi o trabalho de Freitas, Medeiros & Melo (2008), que avaliou os modelos de estoque periódico, EOQ e Silver Meal aplicados à indústria farmacêutica, porém não considerou demanda estocástica e nem o uso de estoque de segurança.

O principal objetivo do mesmo é comparar os dois modelos e apresentar a diferença entre os custos de adoção de cada política, em um cenário de demanda variada. A comparação foi feita utilizando os softwares Microsoft Excel e @Risk para analisar informações obtidas de fontes secundárias. O primeiro software foi responsável pela montagem das planilhas de cálculos, e o segundo por realizar as simulações dos diferentes cenários.

2. Referencial teórico

2.1. Modelo do lote econômico de compra

Bowersox, Closs & Cooper (2008) definem o planejamento de estoques como a determinação de dois parâmetros, no que diz respeito à matérias-primas: quando efetuar os pedidos e a quantidade a ser pedida a cada ordem. O primeiro é definido pela média da demanda no período e do tempo de reabastecimento, também conhecido como *lead time*, e possíveis variações nestes fatores. O segundo parâmetro é definido por um lote de compra, que pode ser tanto fixo quanto variável ao longo dos períodos, dependendo do modelo de controle de estoques adotado.

O cálculo do tamanho do lote a ser pedido visa equilibrar os custos de manutenção de estoques com os custos de efetuar os pedidos. Também é levada em consideração, em alguns modelos, o nível de serviço proporcionado ao cliente por determinados tamanhos de lote de pedido. Desta forma, dois possíveis objetivos no controle de estoques podem ser definidos: otimizar o custo total ou otimizar o nível de serviço. No primeiro caso, busca-se o menor custo possível. Já no segundo, o objetivo é manter um nível de abastecimento do cliente, buscando muitas vezes minimizar o custo devido a vendas perdidas (BALLOU, 2004).

Plossl (1985) define como uma das primeiras etapas no controle de estoques o balanceamento dos custos de manutenção do estoque e dos custos de pedido de novos lotes de produtos. O autor coloca que, ao se balancear de forma correta estes custos, o custo total da operação é minimizado.

O modelo considerado clássico no cálculo do lote de pedido é o chamado EOQ (*Economic Order Quantity*), ou lote econômico de compra. Criado em 1913 por Ford W. Harris, este modelo considera que tanto a demanda quanto os custos são estáveis ao longo dos diversos períodos considerados. O *lead time* não é considerado por este modelo, e o tempo de reposição dos produtos é instantâneo. Assume-se, então, que o lote completo chegará no momento em que o pedido for colocado (ROSA, MAYERLE & GONÇALVES, 2010).

Segundo Porteus (2002), o modelo EOQ pode ser definido como um modelo no qual um único produto é utilizado, com uma demanda fixa e conhecida ao longo do tempo e sem um limite de períodos. Falta de produtos não é permitida, logo toda a demanda é sempre atendida. O custo de pedido é constante e um custo de manutenção do estoque por unidade, também constante, é adicionado.

Os principais pressupostos do modelo EOQ, segundo Muller (2003), são:

- a) a demanda é constante em todos os períodos, não possuindo variações; é recorrente e conhecida;

- b) o custos de armazenagem e de pedido são independentes do tamanho do lote, ou seja, não há descontos para lotes maiores;
- c) o *lead time* é zero;
- d) somente um item é considerado;
- e) as ordens chegam em lotes únicos, sendo que não há vendas perdidas ou re-pedidos.

A fórmula matemática utilizada para seu cálculo, segundo Porteus (2002), é:

$$Q = \sqrt{\frac{2K\lambda}{h}}$$

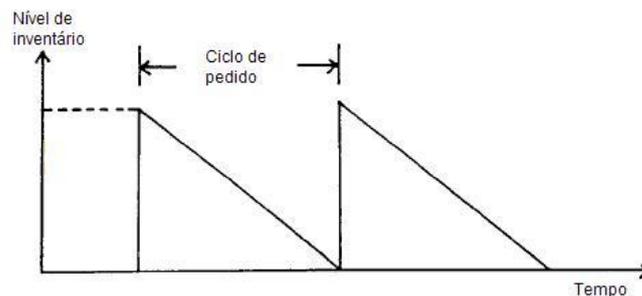
Q = lote econômico ou EOQ

K = custo do pedido por lote

λ = demanda média por unidade de tempo

h = custo unitário de armazenamento

Graves, Kan & Zipkin (1993) ilustram o modelo EOQ na Figura 1 a seguir, demonstrando que este modelo é uma simplificação muito grande da realidade. Sua representação gráfica lhe proporcionou o nome de “gráfico dentes-de-serra” (BALLOU,2004).



Fonte: Graves, Kan & Zipkin (1993)

Figura 1 – Representação gráfica do modelo EOQ

Variações da fórmula EOQ permitem que se determine: o lote que permite os menores custos ou o melhor atendimento ao cliente; quando deve ser feito o pedido; o custo total; o nível médio de estoque; e o nível máximo de estoque (MULLER, 2003).

Seu uso permite observar que: o lote econômico encontra-se na intersecção entre as curvas de custo de pedido e custo de manutenção de estoques; o estoque médio é igual à metade do lote; e o valor da unidade de estoque possui uma relação direta com a frequência dos pedidos de reabastecimento (BOWERSOX, CLOSS & COOPER, 2008).

Porém, este modelo, como dito anteriormente, é apenas o ponto de partida para as aplicações reais, pois estas demandam a inserção de restrições para que o modelo seja condizente à realidade, como variações na demanda e *lead time*, fatores macro e microeconômicos, estado financeiro da indústria, capacidade de produção e de armazenagem e o fato de a produção não ser feita em lotes em muitas indústrias (PLOSSL, 1985; WILD, 2002; RUMYANTSEV & NETESSINE, 2007). Este modelo também leva a estoques excessivos em alguns casos (WILD, 2002).

Visando contornar estes problemas e aumentar sua aplicabilidade em diferentes casos reais, uma série de pesquisadores vem investindo no desenvolvimento de variações do modelo

EOQ, visando englobar os fatores citados anteriormente.

Rosa, Mayerle & Gonçalves (2010) realizaram um estudo de simulação da variação nos valores de *lead time* de um fornecedor, sob políticas de revisão de estoques tanto contínua quanto periódica, revelando que o uso do EOQ levou a um menor custo total e estoque médio.

Berman & Perry (2006) demonstram um modelo no qual a taxa de demanda é relacionada ao nível de estoque, visando simular a situação no varejo na qual o aumento da quantidade de produtos na gôndola dos supermercados aumenta as vendas do produto. O modelo é semelhante ao EOQ, porém com variações aleatórias na demanda.

Uma análise feita por Rumyantsev & Netessine (2007) considerou a aplicação de diversos modelos de estoques como EOQ e suas variações e o Newsboy Problem em um conjunto de dados de 722 empresas norte-americanas no período de 1992-2002, verificando que estas explicam a evolução dos estoques de forma significativa.

Hsiao & Lin (2005) propõe uma análise de um modelo em que só há um fornecedor e um comprador, sendo que o primeiro detém monopólio do mercado e possibilidade de controle de *lead time*. Ouyang, Wu & Yang (2007) estudaram uma situação na qual existe uma restrição com relação à capacidade de armazenagem disponível, com descontos e prazo para pagamento pelo varejo. Erdem, Fadiloglu & Ozekici (2006) consideram um sistema no qual existem múltiplos fornecedores com capacidades de produção variáveis, gerando variações nos lotes.

Ng et al. (2009) estudam um problema no qual a capacidade de armazenagem é uma das variáveis utilizadas para calcular o lote econômico. Mishra & Mishra (2008) propõe um modelo de EOQ voltado a um mercado perfeito de produtos perecíveis. Eynan & Kropp (2007), por sua vez, estudam a modificação do modelo EOQ e sua aplicação no caso de demanda estocástica com custos relacionados a vendas perdidas. Min & Pheng (2006) discutem sobre a aplicação dos modelos EOQ e JIT na indústria de concreto, focando no uso de descontos no lote econômico.

2.2. Modelo de Wagner-Within

Visando criar um modelo que considerasse outros fatores pertinentes à realidade das empresas, Wagner & Whitin (2004) desenvolveram em 1958 um algoritmo para a resolução de problemas baseados no EOQ, porém com possível variação de demanda, custos de manutenção de estoque e custos de pedido. Os autores observaram que, caso a demanda ou os custos de inventário variassem, a fórmula do EOQ não mais resultava na solução de mínimo custo.

Diferentemente do modelo anterior, este se utiliza de revisões periódicas, ou seja, em intervalos de tempo constantes e pré-estabelecidos, verifica-se a produção e o estoque para fazer o pedido de produto, baseando-se na previsão de demanda. No caso do EOQ, este monitoramento era constante. Porém, assim como o modelo anterior, este possui uma grande dificuldade de aplicação direta em situações reais por não considerar o *lead time* dos pedidos, fator de grande importância para as indústrias, principalmente as que lidam com produtos perecíveis.

Segundo Graves, Kan & Zipkin (1993), este modelo não permite que ocorra falta de estoque; possui um estoque inicial zero; e os custos de pedido e de manutenção do estoque são lineares. O modelo de minimização de custos de Wagner-Whitin, segundo Graves, Kan & Zipkin (1993), é o que se segue:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{t=1}^n [c_t(y_t) + h_t(x_t)] \\ & \text{sujeito a} \quad x_t = \sum_{j=i}^t (y_j - r_j) \\ & \quad x_i \geq 0, t = 1, \dots, n \\ & \quad x_0 = 0 \end{aligned}$$

c_t = custo de pedido no período t

y_t = estoque inicial no período t

h_t = custo de pedido no período t

x_t = estoque no final do período t

Da mesma forma que ocorre com o EOQ, diversas alterações no modelo de Wagner-Whitin foram feitas para tornar sua aplicação mais próxima de situações reais nas indústrias. Richter, Pakhomova & Dobos. (2006) desenvolveram uma adaptação do modelo de Wagner-Whitin para lidar com controle de estoques de produtos que utilizam recursos naturais, considerando as várias etapas envolvidas na comercialização nestes mercados.

Kun, Zhuang & Ku (2009), por sua vez, descrevem um modelo de Planejamento de Requisição de Materiais (MRP ou *Materials Requirements Planning*) que utiliza monitoramento periódico baseado no modelo de Wagner-Whitin. Neste caso, os autores incorporam uma taxa relacionada à deterioração de produtos, que age como uma forma de penalização sobre o estoque mantido ao longo do tempo, levando a uma diminuição no tamanho do lote de pedido e a pedidos mais frequentes.

Vyve & Ortega (2004) propõe uma variação do modelo de Wagner-Whitin na qual existe um custo fixo relacionado aos estoques, situação citada pelos autores como comum no ambiente industrial de produção.

Estudo feito por Agra & Constantino (1999) adapta o modelo de Wagner-Whitin para utilização em situações com demanda não atendida (*backlogging*) e custos iniciais. Porém, ainda considera-se que a demanda é conhecida a cada período, não levando em consideração as possíveis variações de demanda.

Wolsey (2006) estuda a resolução de problemas de janelas de tempo de produção e de entrega utilizando uma adaptação do modelo de Wagner-Whitin, resolvido através do uso de programação inteira mista.

Buscando resolver problemas enfrentados por empresas de pequeno porte relacionados à sua capacidade de produção e de manutenção de estoques, Hui & Lau (2003) propõe um modelo de minimização de custos baseado no modelo de Wagner-Whitin, porém com adição de estoque de segurança, lote econômico de produção, capacidade limitada de produção e estimativa da precisão das previsões feitas anteriormente com relação à produção e acúmulo de estoques. Através de aplicação real em uma empresa, os autores obtiveram reduções significativas nos custos de manutenção de estoques.

2.3. Modelo de Silver Meal

A heurística de Silver-Meal, criada por Edward Silver e Harlan Meal, é uma variante da EOQ que se aproxima da otimalidade do algoritmo de Wagner-Whitin. (GRAVES, KAN &

ZIPKIN, 1993). Tem por objetivo minimizar os custos totais por período, resultantes da antecipação para o presente da produção/compra da demanda de períodos futuros. O tamanho de lote deve cobrir um número inteiro de períodos de 1 até T, sendo que T é a variável de decisão. Segundo Graves, Kan & Zipkin (1993), a formulação matemática é:

$$CT = (\text{Custo de Enc} + \text{Custo de Posse até o fim do Período } T) / T = (\text{Custo de Enc.} + hP \sum_{k=1}^T (k-1)R_k) / T$$

onde:

h = Custo de posse por período em fração do custo unitário

P = Custo unitário

R = Procura no período k

T = Número de períodos de tempo para qual a encomenda durará

A principal razão para se utilizar um processo heurístico é tentar absorver os aspectos dinâmicos do mercado e utilizá-los continuamente para buscar a melhor solução para um dado período.

Essa metodologia é utilizada quando o coeficiente de variação da demanda (desvio padrão/demanda média) é maior que 0,5. Essa regra é definida como regra de Peterson & Silver e pode ser utilizada como parâmetro para diferenciação entre a utilização das metodologias de Wagner-Within e Silver-Meal (WANKE, 2003).

As principais aplicações do tamanho de lote dinâmico são os seguintes modelos: MRP, DRP, padrões sazonais de demanda e demanda com acréscimo/decrécimo, sendo que todos são utilizados pela indústria. Wanke (2003), exemplifica a aplicação desse método de acordo com a Tabela 1:

Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Demanda	77	42	38	21	26	112	45	14	76	38	489
Razão CT(T)/T	Q1	132	78,6	67,15	60,6						
	Q2			132	99,6	67,2	84,4	69,6	92,16		
	Q3								132	77,4	
Lotes											Total
Lote Q1	77	42	38	21							178
Lote Q2					26	112	45	14			197
Lote Q3									76	38	114

Fonte: (WANKE, 2003)

Tabela 1 – Exemplificação do método de Silver-Meal

De acordo com a Tabela 1, a heurística de Silver-Meal propõe que o custo de antecipação da compra/produção reduz até o período 4 e a partir do período 5, o custo de antecipação dos lotes começa a aumentar por causa do custo de oportunidade, sendo assim, é necessário pedir um novo lote.

3. Metodologia

3.1. Classificação do Método de Pesquisa

Gil (1999) afirma que uma pesquisa é um “processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos”. A primeira etapa para a realização da pesquisa é planejá-la, escolhendo a abordagem a ser dada e o problema a ser tratado.

Utilizando os critérios apresentados por Silva e Menezes (2005), pode-se classificar a presente pesquisa como sendo:

- a) aplicada, pois está voltada ao debate e à discussão do conhecimento aplicado e dirigido à solução de problemas específicos, cujos resultados também são de abrangência local.
- b) quantitativa, pois gera e discute resultados baseados na exploração de cálculos numéricos e técnicas estatísticas, ou seja, as informações cruciais do projeto são obtidas e avaliadas por meio de números.
- c) exploratória, uma vez que, coletando e analisando dados e informações de um determinado fenômeno, tenta compreendê-lo de forma mais abalizada, construindo e testando hipóteses sobre o objetivo de estudo.
- d) estudo de caso, considerando-se que todos os esforços acadêmicos voltaram-se para um determinado problema, estudando-o e configurando-o de modo específico e sensivelmente detalhado.

No que diz respeito ao estudo de caso, primeiramente foi feita a coleta de dados relacionados aos custos de ressurgimento, manutenção do estoque, pedido e *set-up* junto à indústria estudada. Após esta etapa, fez-se uma análise dos dados utilizando o software Microsoft Excel, e foram montados os modelos Uniforme, EOQ e Silver Meal nas planilhas.

O passo seguinte foi utilizar o software @Risk com uma distribuição normal para simulação dos cenários estudados: sem incerteza na demanda, com incerteza na demanda e com incerteza na demanda e uso de estoque de segurança. Optou-se por utilizar a simulação de Monte Carlo pois esta simula cenários de demanda estocástica com base nos dados inseridos no programa, gerando séries aleatórias chamadas de interações. Com um número considerável de interações, é possível obter-se uma média que incorpora diversas situações e reflete melhor a realidade do que apenas o uso da média e do desvio padrão, sem repetições.

4- Aplicação em uma indústria metalúrgica

O seguinte estudo foi desenvolvido em uma empresa automobilística situada em Minas Gerais cujo problema era a falta de alguns produtos por ineficiência no modelo de ressurgimento de peças automotivas. A falta de alguns produtos gerava uma sobrecarga de estoque nos pedidos posteriores, dificultando o equilíbrio entre o uso e o ressurgimento. Além disso, quando ocorria um *stockout*, eram feitos pedidos emergenciais, incorrendo em um custo de ressurgimento e transporte alto.

Um dos graves problemas relacionados à logística enfrentados pela empresa é o fato de não existir um padrão linear de uso das peças nas linhas de produção, gerando uma demanda irregular e um custo de estoque alto. O estudo se propõe a analisar os modelos de gestão de estoque através de simulação de Monte Carlos com o software @Risk.

Foram simuladas 3 situações: sem incertezas na demanda, ou seja, com desvio padrão da demanda de 0%; com incertezas na demanda, em 4 diferentes cenários: desvio padrão da

demanda de 10%, 20%, 30% e 40%; e com incorporação do estoque de segurança e um desvio padrão da demanda de 10%. Foi feita uma análise destes dados com relação à: custo anual de falta de estoque, custo anual de *set-up* e custo anual de estoque, utilizando as diferentes políticas de controle de estoques: EOQ, Silver-Meal e Uniforme.

5. Resultados e Discussão

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos pela análise dos diferentes cenários propostos, e a mesma encontra-se dividida em: cenário sem incertezas, cenários com estoque de segurança real e cenários com estoque de segurança variável.

5.1. Cenário 1- Sem incertezas

O primeiro cenário foi desenvolvido para analisar os modelos (uniforme, EOQ e Silver Meal) sem uma variação da demanda ou incerteza. Esse cenário é importante para analisar o comportamento inicial dos modelos em um ambiente com as principais variáveis constantes, e, apesar de ser hipotética, pode ser justificada pela possível adoção de processos *Just-in-time*, que iriam reduzir as variâncias e o estoque de segurança. O resultado da modelagem é apresentado na tabela a seguir:

Custos	Uniforme	EOQ	Silver Meal
Custo Anual da Falta	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custo Anual do Estoque e Set up	R\$ 6.864	R\$ 4.969	R\$ 3.624
Total	R\$ 6.864	R\$ 4.969	R\$ 3.624

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 3 - Resultados do Cenário 1

Percebe-se que o modelo de ressurgimento uniforme detém o maior custo entre os modelos estudados, com um custo 38% maior que o EOQ e 89% maior que o Silver Meal. Isso acontece pois uma característica básica do modelo é trabalhar em um horizonte de planejamento curto (períodos de uma semana), sem considerar o *lead time*.

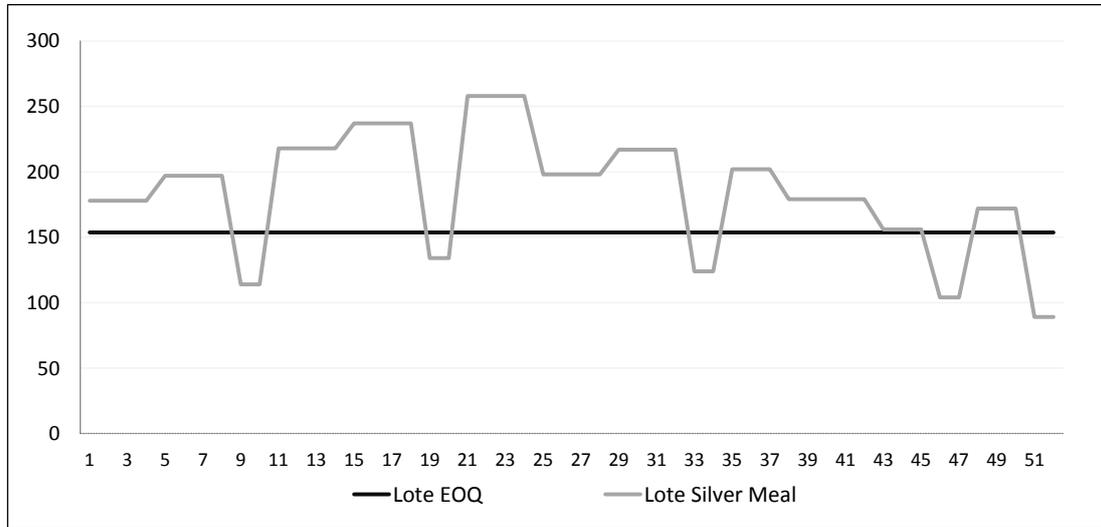
Desta forma, a quantidade de produtos que devem ser enviados é a quantidade exata de produtos consumidos na semana, fazendo com que o modelo incorra em um custo de ressurgimento semanal, o que evita a consolidação e a economia de escala.

O modelo de Lote Econômico ou EOQ detém o segundo maior custo dentre os modelos analisados, e é caracterizado por originar um lote fixo ótimo para o ressurgimento ao longo de um longo horizonte de tempo. No caso estudado, foi escolhido um lote ótimo a ser aplicado durante o ano todo.

Ao analisar a série de previsão de demanda da empresa, percebe-se que ocorre uma significativa variação da mesma ao longo do ano. Como o modelo de lote econômico de compra utiliza um lote fixo para uma demanda com grande coeficiente de variação, ao utilizar este modelo, a empresa irá observar um excesso de estoque em certos momentos e falta de produto em outros.

Um coeficiente de variação alto facilita a utilização do modelo de Silver Meal, pois o “lote econômico” calculado por este modelo é dinâmico. Ou seja, o mesmo varia de acordo com a variação da demanda. A empresa consegue adequar seu estoque para momentos de baixa e alta demandas, economizando em estoque e evitando falta de produtos. O Gráfico 2 a seguir demonstra o lote econômico de cada modelo ao longo do ano.

Pode-se observar, a partir deste gráfico, que o modelo de Silver Meal possui grande variação no tamanho do lote ao longo do ano, visando incorporar a previsão de demanda no tamanho do lote.



Fonte: Elaborado pelos autores

Gráfico 2 - Lote econômico ao longo do ano utilizando os modelos do EOQ e Silver Meal

5.1.2. Cenário 2 – Com incertezas

O modelo do cenário dois foi desenvolvido utilizando o software *@Risk*. Esse software, desenvolvido pela empresa Palisade Corporation, possui como objetivo auxiliar na elaboração de simulações em planilhas eletrônicas. Esse cenário incorporou incertezas no modelo através de uma distribuição normal, utilizando o desvio padrão da demanda. Nesse cenário foram simuladas 4 simulações com 2000 iterações, diferenciando-as de acordo com o desvio padrão da demanda (10%, 20%, 30% e 40% de desvio padrão).

Este número de simulações foi escolhido, pois foi observado que mais de 2000 repetições não geram resultados significativamente diferentes, sendo que as médias dos custos nestes casos é praticamente a mesma que a obtida fazendo-se 2000 repetições.

O resultado do cenário com incertezas encontra-se na Tabela 4, a seguir.

Desvio Padrão	Cenário 1	10%	20%	30%	40%
Uniforme	Cenário 1	10%	20%	30%	40%
Custo Anual de Falta	R\$ -	R\$ 3.327	R\$ 6.654	R\$ 9.981	R\$ 13.309
Custo Anual do Estoque	R\$ 6.864	R\$ 6.864	R\$ 6.864	R\$ 6.864	R\$ 6.864
Total	R\$ 6.864	R\$ 10.191	R\$ 13.518	R\$ 16.845	R\$ 20.173
EOQ	Cenário 1	10%	20%	30%	40%
Custo Anual de Falta	-	R\$ 112	R\$ 383	R\$ 821	R\$ 1.471
Custo Anual do Estoque	R\$ 4.969	R\$ 4.897	R\$ 4.859	R\$ 4.850	R\$ 4.850
Total	R\$ 4.969	R\$ 5.008	R\$ 5.242	R\$ 5.671	R\$ 6.320
Silver Meal	Cenário 1	10%	20%	30%	40%
Custo Anual de Falta	R\$ -	R\$ 833	R\$ 1.667	R\$ 2.500	R\$ 3.334
Custo Anual do Estoque	R\$ 3.624	R\$ 3.624	R\$ 3.624	R\$ 3.624	R\$ 3.624
Total	R\$ 3.624	R\$ 4.457	R\$ 5.291	R\$ 6.124	R\$ 6.958

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 4 - Resultados do Cenário 2

Ao incorporar incertezas no modelo através do uso de desvio padrão na demanda, ocorre uma mudança nos custos de estoque, *set-up* e de falta. No cenário anterior, o modelo de Silver Meal resulta em menores custos, mas no cenário dois essa relação se inverte devido ao modelo de Silver Meal ser mais sensível à variação da demanda, gerando um custo de *stockout* alto.

Essa sensibilidade é devido ao fato de o modelo trabalhar com uma quantidade de estoque menor. O modelo de lote econômico, por ter um estoque mais alto, consegue reagir à variação da demanda de uma forma melhor, evitando em certos momentos a falta de produtos.

5.1.3 Cenário 3 – Com estoque de segurança

Para adaptar o modelo anterior à realidade, é necessário incorporar o estoque de segurança, visando diminuir a chance de ocorrência de *stockouts*. Para isto, foi utilizada a metodologia proposta por Wanke (2003), onde o mesmo define o estoque de segurança como uma reserva para fazer frente a variações “incertas do tempo de resposta”. O estoque de segurança foi calculado de acordo com a fórmula tradicional, proposta por Wanke (2003).

$$ES = K \cdot \sigma$$

Onde:

ES = Estoque de segurança expresso em unidades

K = fator de K que corresponde a $f(k)$, uma função da distribuição normal acumulada que indica a probabilidade de haver um demanda maior que o estoque de segurança projetado, considerando-se um determinado nível de serviço ao cliente.

σ = Desvio padrão combinado, considerando-se incertezas de demanda durante o tempo de reposição

O Cenário 3 introduziu o estoque de segurança no modelo de simulação de estoque em conjunto com a variação da demanda. Para esta simulação, o parâmetro utilizado para os cálculos foi o desvio padrão de 10%. A simulação deste cenário levou em consideração 4 simulações com 2000 interações cada. O resultado se encontra na Tabela 5.

É importante notar que o Cenário 3, com estoque de segurança, mostrou um custo menor que o Cenário 2, considerando incertezas porém sem estoque de segurança. Este resultado ocorre devido ao fato de que o modelo de Silver Meal é um modelo sensível à falta de estoque, por seu cálculo levar a estoques menores. Ao se incorporar um estoque de segurança, o modelo se torna mais viável economicamente por reduzir os custos de falta, mesmo havendo um aumento dos custos de estoque.

As simulações feitas levam em consideração o coeficiente k da distribuição normal para avaliar o impacto do aumento do estoque de segurança nos custos de estoque e de falta, segundo definido por Wanke (2003). Com um coeficiente k de 0,53, os custos de falta e de estoque são reduzidos, sendo este o valor escolhido para a aplicação dos modelos. As iterações que utilizaram um valor de k maior não foram consideradas como boas soluções por representarem um esforço desnecessário em face da pequena economia atingida.

Nível de Serviço	50%	60%	70%	85%	95%	98%
Coeficiente K	0	0,25	0,53	1,04	1,65	2,08
Uniforme						
		0,25	0,53	1,04	1,65	2,08
Custo Anual da Falta	R\$ 3.327	R\$ 638	R\$ 106	R\$ 3	R\$ 0	R\$ -
Custo Anual do Estoque	R\$ 6.864	R\$ 6.944	R\$ 7.034	R\$ 7.198	R\$ 7.393	R\$ 7.531
Total	R\$ 10.191	R\$ 7.583	R\$ 7.140	R\$ 7.201	R\$ 7.393	R\$ 7.531
EOQ						
	0	0,25	0,53	1,04	1,65	2,08
Custo Anual da Falta	R\$ 112	R\$ 101	R\$ 72	R\$ 68	R\$ 46	R\$ 28
Custo Anual do Estoque	R\$ 4.897	R\$ 4.949	R\$ 4.917	R\$ 5.135	R\$ 5.279	R\$ 5.670
Total	R\$ 5.009	R\$ 5.050	R\$ 4.989	R\$ 5.203	R\$ 5.325	R\$ 5.698
Silver Meal						
	0	0,25	0,53	1,04	1,65	2,08
Custo Anual da Falta	R\$ 833	R\$ 111	R\$ 14	R\$ 0	R\$ -	R\$ -
Custo Anual do Estoque	R\$ 3.624	R\$ 3.648	R\$ 3.676	R\$ 3.726	R\$ 3.787	R\$ 3.829
Total	R\$ 4.457	R\$ 3.759	R\$ 3.690	R\$ 3.726	R\$ 3.787	R\$ 3.829

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 5 – Resultado da Simulação

6. Conclusões

Como pode ser observado no presente estudo, o uso de diferentes modelos gera diferentes resultados com relação ao custo total, sendo que o mínimo custo é obtido pelo modelo que mais se adapta à situação estudada. No caso da indústria estudada, o modelo de Silver-Meal se mostrou mais adequado devido às variações observadas na demanda, caso o estoque de segurança seja incorporado aos cálculos.

O modelo de Silver Meal é mais indicado para ambientes onde a demanda é variável, com isso, o mesmo desenvolve um lote econômico de compra dinâmico para cada variação da demanda ao longo de um tempo.

No cenário 2, o modelo de Silver Meal, que antes da simulação tinha o menor custo, passou a

ter o maior custo quando comparado ao modelo de EOQ. Essa diferença ocorre devido a uma maior sensibilidade do modelo ao custo de falta por se tratar de um modelo com estoque médio menor. Ao incorporar o estoque de segurança no cenário 3, o coeficiente k da distribuição normal que minimiza o custo total é 0,53, exigindo um nível de serviço de 70%. A principal contribuição do trabalho está em alertar que o uso do estoque de segurança se faz necessário ao aplicar os modelos propostos, pois a não utilização do mesmo pode mascarar os custos reais da solução e inverter a solução ótima, quando não utilizado.

Referências

- AGRA, A. & CONSTANTINO, M.** *Lotsizing with backlogging and start-ups: the case of Wagner-Whitin costs.* Operations Research Letters. Vol. 25, p.81-88, 1999.
- ARNOLD, J. R. T. & STEPHEN, N. C.** *Introduction to Materials Management.* 4 ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 2001.
- BALLOU, R. H.** *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial.* 5 ed. São Paulo: Bookman, 2004.
- BERMAN, O. & PERRY, D.** *An EOQ model with state-dependent demand rate.* European Journal of Operation Research 171 p.255-272, 2006.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. & COOPER, M. B.** *Gestão da Cadeia de Suprimentos e Logística.* 2 ed. São Paulo: Elsevier Editora, 2008.
- CORREA, H. L.** *Planejamento, Programação e Controle da Produção – MRP II ERP, Conceitos, Uso e Implantação.* São Paulo: Atlas, 2000.
- ERDEM, A. S.; FADILOGLU, M. M. & OZEKICI, S.** *An EOQ model with multiple suppliers and random capacity.* Naval Research Logistics, Vol. 53, p.101-114, 2006.
- EYNAN, A. & KROPP, D. H.** *Effective and simple EOQ-like solutions for stochastic demand periodic review systems.* European Journal of Operational Research 180, p.1135-1143, 2007.
- FLEURY, R. E.; WANKE, P. & FIGUEIREDO, K.** *Logística Empresarial: a Perspectiva Brasileira.* São Paulo: Atlas, 2000.
- FREITAS, F. F. T.; MEDEIROS, C. V. S. & MELO, A. C. S.** *Aplicação de técnicas de gestão de estoques, como auxílio à tomada de decisões em compras públicas estaduais de medicamentos.* In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- GRAVES, S. C.; KAN, A. H. G. R. & ZIPKIN, P. H.** *Logistics of Production and Inventory.* 1 ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993.
- GIL, A. C.** *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.* 5 ed. São Paulo: Atlas, 1999, 207 p.
- HSIAO, J. M. & LIN, C.** *A buyer-vendor EOQ model with changeable lead-time in supply chain.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology 26 p.917-921, 2005.
- HUI, I. K. & LAU, H. C. W.** *A dynamic inventory-production scheduling model for small scale organisations.* International Journal of Advanced Manufacturing Technologies 22, p.89-100, 2003.
- KUN, Z.; ZHUANG, L. & KU, T. G.** *The systemic research on the enterprise production planning with guarantee period based on Wagner-Whitin algorithm.* Seventh ACIS International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications, p. 153-155, 2009.
- LI, L.** *The role of inventory in delivery-time competition.* Management Science, No 38, p.182-197, 1992.
- MIN, W. & PHENG, L. S.** *EOQ, JIT and fixed costs in the ready-mixed concrete industry.* International Journal on Production Economics 102, p.167-180, 2006.
- MISHRA, S. S. & MISHRA, P. P.** *Price determination for an EOQ model for deteriorating items under perfect competition.* Computers and Mathematics with Applications 56, p.1082-1101, 2008.
- MULLER, M.** *Essentials of Inventory Management.* 1 ed. New York: American Management Association, 2003.
- NG, C. T.; CHENG, T. C. E.; KOTOV, V. & KOVALYOV, M. Y.** *The EOQ problem with decidable*

warehouse capacity: analysis, solution approaches and applications. Discrete Applied Mathematics 157, p.1806-1824, 2009.

OUYANG, L.; WU, K. & YANG, C. *An EOQ model with limited storage capacity under trade credits.* Asia-Pacific Journal of Operational Research, Vol. 24, No. 4 p.575-592, 2007.

PLOSSL, G. W. *Production and Inventory Control: Principles and Techniques.* 2 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1985.

PORTEUS, E. L. *Foundations of Stochastic Inventory Theory.* 1 ed. Stanford: Stanford University Press, 2002.

RICHTER, K.; PAKHOMOVA, N. V. & DOBOS, I. *A Wagner/Whitin natural resource stock control model.* International Journal of Production Economics. Vol. 104, p.419-426, 2006.

ROSA, H.; MAYERLE, S. F. & GONÇALVES, M. B. *Controle de estoque por revisão contínua e revisão periódica: uma análise comparativa utilizando simulação.* Revista Produção. Vol. 20, No. 4, p.626-638, 2010.

RUMYANTSEV, S. & NETESSINE, S. *What can be learned from classical inventory models? A cross-industry exploratory investigation.* Manufacturing & Service Operations Management, Vol. 9, No. 4 p.409-429, 2007.

RYZIN, G. J. V. *Analyzing Inventory Cost and Service in Supply Chains.* New York: Columbia Business School, 2001.

SILVA, E.L, MENEZES, E. M.. *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação.* 4. Ed. Ver. Atual. Florianópolis: UFSC, 2005, 138 p.

VYVE, M. V. & ORTEGA, F. *Lot-sizing with fixed charges on stocks: the convex hull.* Discrete Optimization. Vol. 1, p.189-203, 2004.

WAGNER, H. M. & WHITIN, T. M. *Dynamic version of the economic lot size model.* Management Science. Vol. 50, No. 12 Supplement, p.1770-1774, 2004.

WANKE, P. *Gestão de Estoques na Cadeia de Suprimentos: Decisões e Modelos Quantitativos.* São Paulo: Atlas, 2003.

WILD, T. *Best Practice in Inventory Management.* 2 ed. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2002.

WOLSEY, L. A. *Lot-sizing with production and delivery time windows.* Mathematical Programming. Ser. A, 107, p.471-489, 2006.